



**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A
TELEKOMUNIKACÍ**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vliv Single Event Efektů na elektronické systémy

**Autor práce: Karel Hamerník
Vedoucí práce: Ing. Jan Broulím Ph.D.**

Plzeň 2019

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Karel HAMERNÍK**

Osobní číslo: **E15B0286P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**

Název tématu: **Vliv Single Event Efektů na elektronické systémy**

Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vytvořte literární rešerži na téma vlivu Single Event Efektů (SEE) na elektronické systémy.
2. Sestavte přehled fyzikálních zákonů týkajících se dané problematiky.
3. Diskutujte možnosti zabránění vlivu radiace na spolehlivost elektronických systémů.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Michael Nicolaidis: Soft Errors in Modern Electronics Systems. Springer, 2011.

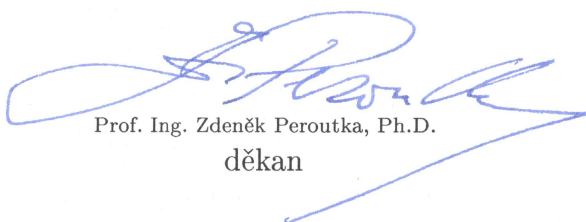
Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jan Broulím


Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. června 2019**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Hamerník, Karel. Vliv Single Event Efektů na elektronické systémy. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací, 2019, 50s., vedoucí práce Ing. Jan Broulím, Ph.D

V bakalářské práci se zabývám Single Event Efekty, jejich dělení, testování a datové analýze, dále zde popisuji druhy ionizujícího záření.

Klíčová slova

Single Event Efekty, ionizující záření, testování SEE, analýza dat SEE

Abstract

Hamerník, Karel. Single Event Effects in electronic systems. University of West Bohemia in Pilsen, Faculty of electrical engineering, Department of applied electronics and telecommunications, 2019, 50p., head: Ing. Jan Broulím, Ph.D.

The purpose of my bachelor thesis is describe Single Event Effects, their distribution, testing and data analysis, there is also described ionizing radiation.

Key words

Single Event Effects, ionizing radiation, testing of SEE, data analysis of SEE

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni, dne

.....

Podpis

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat Ing, Janu Broulímovi, Ph.D., za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

Obsah

1	Úvod	13
2	Historie	14
2.1	Hughesovy satelity	14
2.2	Satelity Rockwell electronics	15
2.3	Historie SEU ve vesmíru	16
3	Ionizující záření	18
3.1	Druhy ionizujícího záření	18
3.1.1	Přímo a nepřímo ionizující záření	19
3.1.2	Elektromagnetické a korpuskulární záření	19
3.2	Vlastnosti jednotlivých druhů záření	19
3.2.1	Záření alfa	19
3.2.2	Záření beta	20
3.2.3	Gama záření	21
3.2.4	Rentgenové záření	23
3.2.5	Neutronové záření	25
3.2.6	Kosmické záření	26
3.3	Fyzikální veličiny popisující záření	27
4	Definice SEE	32
4.1	Základní procesy	33
4.2	Single Event Upsets	36
4.2.1	Multiple Bit Upsets	37
4.3	Single Event Transients	37
4.3.1	Analog Single Event Transient	38
4.3.2	Digital Single Event Transient	38
4.4	Single Event Functional Interrupt	38
4.5	Single Event Latch-up	38
4.6	Single Event Burnout	38
4.7	Single Event Gate Rupture	39
4.8	Single Event Snapback	39
5	Testování SEE	40
5.1	Urychlovače částic	40
5.1.1	Van de Graaffův urychlovač	41

5.1.2	Cyklotron	41
5.1.3	Synchrotron	41
5.1.4	Bevatron	42
5.2	Testování pomocí protonů	42
6	Zpracování dat SEE	43
6.1	Opakované testování	45
7	Zabránění SEE	47
8	Závěr	48

Seznam obrázků

1	Stopy těžkých iontů zanechané ve fotografické emulzi (převzato z [3]) . . .	16
2	Alfa záření (převzato z [11])	20
3	Zastavení alfa záření listem papíru (převzato z [4])	20
4	Beta záření (převzato z [11])	21
5	Zastavení beta záření hliníkovou deskou (převzato z [4])	21
6	Gama záření (převzato z [11])	22
7	Zastavení gama záření olovenou deskou (převzato z [4])	23
8	Rentgenové záření (převzato z [11])	23
9	Neutronové záření (převzato z [11])	25
10	Zastavení neutronového záření pomocí vody (převzato z [4])	26
11	Interakce dopadajícího iontu s hmotou 1/2 (převzato a upraveno z [16]) . .	34
12	Interakce dopadajícího iontu s hmotou 2/2 (převzato a upraveno z [16]) . .	35
13	Integrál pod křivkou proudu je roven nahromaděnému náboji (převzato z [16])	36
14	Single Event Upset (převzato z [16])	37
15	Data se příležitostně opakují ve velké sérii běhů. Na rozdíl od obr. 16 si experimentátoři nevšimli, že jejich data jsou nekonzistentní (převzato a upraveno z [2])	45
16	Vzorová data s odchýleným bodem. Odchýlený bod je dvakrát vyšší než ostatní body. To je zjevně omyl a tento bod by měl být zamítnut. (převzato a upraveno z [2])	46
17	Tato data ukazují, že zde se systematické chyby vyskytují mnohem větší než statistické chyby. Zdá se, že se vyskytují při změnách paprsku (X), což indikuje problémy dozimetru. (převzato a upraveno z [2])	46

Seznam tabulek

1	SEU v satelitech zaznamenaný v letech 1970 - 1982 (převzato a upraveno z [3])	17
2	Urychlovače použité pro testování Single Eventů (převzato a upraveno z [3])	40
3	Dílčí standartní odchylka korespondující s počtem sledovaných zařazení (převzato z [2])	44

Seznam symbolů a zkratek

GCR - Galactic Cosmic Ray

KERMA - Kinetic Energy Released in Material

LET - Linear Energy Transfer

SBU - Single-Bit Upset

SEB - Single Event Burnout

SEE - Single Event Effect

SEFI - Single Event Functional Interrupt

SEGR - Single Event Gaterupture

SEL - Single Event Latchup

SESB - Single Event Snapback

SET - Single Event Transient

SEU - Single Event Upset

SHE - Single Hard Error

1 Úvod

Cílem této práce je sestavit rešerši na téma vliv Single Event Efektů. Single Event Efekt dále jen SEE, je elektrické narušení, které znemožňuje normální chod elektrického obvodu. Je způsobeno průchodem jediného iontu skrz, nebo poblíž citlivého uzlu v obvodu. Single Event Efekty mohou být jak destruktivní, tak nedestruktivní. SEE vyvolané těžkými ionty, protony a neutrony se staly rostoucím omezením spolehlivosti elektronických součástek, obvodů a systémů, a to jak na zemi, tak hlavně v avionice a elektronice použité ve vesmíru. Proto se v této práci budu věnovat popisu vlivu SEE na elektronické systémy.

Ve druhé kapitole se podíváme trochu do historie SEE. Třetí kapitola bude pojednávat o jednotlivých druzích ionizujících záření, včetně fyzikálních vztahů. Ve čtvrté kapitole budou popsány známé druhy SEE, na které bude v páté kapitole navazovat jejich testování. V neposlední řadě bude popsáno jak s takovými výsledky testování správně zacházet. Na samotném konci této práce bude diskutováno jak vlivům SEE zabránit.

2 Historie

Single Event Upsets (SEUs) v elektronice byly poprvé popsány v roce 1962 (J.T. Wallmark and S.M. Marcus, "Minimum size and maximum packaging density of non-redundant semiconductor devices," Proc. IRE, vyd. 50, ps. 286-298, Březen 1962). Předpovídalo se, že kosmické záření bude limitovat velikost zařízení, přičemž udávaná velikost elektronického zařízení byla krychle se stranou o 10 μm , Tento odhad byl založen na velikosti náboje, obsaženého v kosmickém záření, který by mohl narušit chod zařízení [16].

První opravdová anomálie v satelitu byla hlášena v roce 1975. Jednalo se o SEUs v flip-flop obvodech na tabuli komunikačního satelitu. První pozorování SEUs na zemi bylo v roce 1978, objeveno bylo v RAM způsobené alfa částicemi produkované U a Th. První hlášení o SEUs způsobeného kosmickým zářením (tvořeno z 95% neutrony) na zemi bylo v roce 1979. A konečně první hlášení o destrukci způsobenou SEE bylo způsobené v paměti satelitu ERS-1, který byl v tu dobu ve vesmíru a to v roce 1992 [16].

2.1 Hughesovy satelity

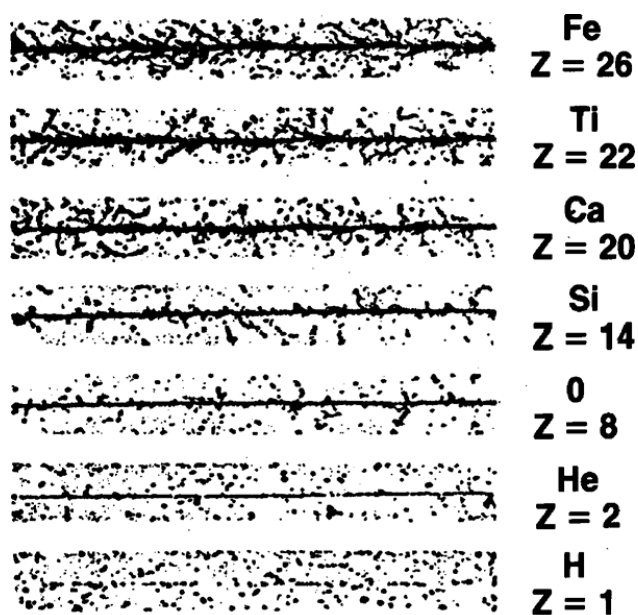
Satelit jménem Explorer I, který obsahoval Geiger-Mullerův (GM) detektor, vůbec poprvé objevil existenci radiačních pásů, které byly později pojmenovány Van Allenovy radiační pásy. Historie SEE ve vesmíru začla díky Howardu Hughesovi. V roce 1972, jeden z Hughesových satelitů ztratil kontakt se zemí na celých 96 sekund, než bylo znovu obnoveno spojení. Začaly tedy výzkumné práce zabývající se proč tomu tak bylo, vedoucím pracovníkem těchto prací byl Ron Obert. Diskutován byl především nápad, že částice v kosmickém paprsku dokáže uchovat náboj, který může způsobit narušení. Byl napsán rozsáhlý počítačový kód, který udělal kompletní analýzu problému, ale jelikož se nejednalo o oficiální program, nelze najít žádné další záznamy týkající se těchto testů. O dva roky později Dr. Smith (známý jako vesmírný šaman pro jeho analýzu vesmírných anomálií) prozkoumal anomálii týkající se téhož satelitu. Nalezl zde neočekávané spouštění digitálních obvodů. Nicméně většina těchto problémů byla způsobena nábojem vzniklým díky vysokým teplotám, některé chyby zůstávaly nadále neobjasněny. Hughesův tým, který se dříve zabýval oním programem, sepsal první článek týkající se SEU, způsobené kosmickým zářením v roce 1975. Tento dokument nebyl nijak kladně přijat, navíc v době kdy byl vydaný se jeho obsah týkal pouze čtyř událostí za dobu sedmnácti let, po kterou byli satelity do vesmíru vypouštěny, kvůli takto malému výskytu problémů se tomu nevěnovala téměř žádná pozornost. Komunita zabývající se radiačními efekty začala být přesvědčena, že tento problém je reálný poté co započali práce na čípech od společnosti Intel. První veřejná prezentace výsledků proběhla v San Diegu, termín připadal na květen

1978. Společnost AT&T měla smlouvu se společností Intel, která měla zajistit výměnu mechanických relé pro dálkové přepínání za integrované obvody (IO). Intel však nalézal přetrvávající problémy ve svých čípech a nakonec nebyl schopen tyto čipy vůbec dodat. Intel představil novou generaci pamětí, u kterých byly nalezeny přetrvávající poruchy. Po přečtení publikace týkající se SEU, proběhly testy, zda by tyto poruchy mohly být způsobeny alfa částicemi a ukázalo se, že ano. Velmi rychle se tedy elektronická komunita dozvěděla o Single Event Efektech a byl poprvé použit termín „soft fail“ [3].

2.2 Satelity Rockwell electronics

Rockwell electronics, zabývající se systémem Global Positioning System (GPS) společnost začala mít problémy vyskytující se v DRAM a to průměrně jeden problém za den. Tyto poruchy byly zprvu připisovány radiaci, nicméně vývojáři byli zprvu skeptičtí a nechtěli uvěřit tomu, že jediná částice by mohla takové chyby způsobit. Rozhodlo se tedy pro testování v cyklotronu o velikosti 88 palců, vystřelili iont Argonu a sledovali jak se chová DRAM před a po testování. Bohužel bylo zjištěno, že tento jediný iont dokáže způsobit náhodné převrácení bitů. Naneštěstí v té době neměli povoleno tyto výsledky sdílet se zbytkem světa. Bylo také zjištěno, že výskyt SEE se zvyšuje se zmenšováním zařízení [3].

Galaktické kosmické záření (dále jen GCR, Galactic Cosmic Ray) a jeho vliv na mikroobvody bylo zkoumáno také již v ranném období problematiky SEE. Firma Aerospace měla program na pozorování GCR a zachycených protonů. Skupina vedená W.A Kolasinskim a J.B. Blakem byla pověřena testováním pamětí proti vysoce nabitým částicím. Bylo totiž zjištěno, že paměti vykazují určité poruchy, avšak nikdo si nebyl jistý, zda by na vině mohlo být právě GCR. V roce 1979 byly provedeny rozsáhlé testy a simulace, ve kterých byl vesmír nahrazen laboratorními podmínkami, bohužel tyto podmínky nebyli zdaleka takové jako skutečný GCR. Testování zahrnovalo vakuovou komnatu (průlet vzduchem by zpomaloval nabitě částice), výsledky testů byly opět zklamáním, některé paměti vykazovaly poruchy snadno a u jiných se dokonce neobjevily žádné. Objevil se však nechvalně známý problém Latch-up. Kolasinski publikoval výsledky testů, včetně vzorku, jež ukazuje ionizaci GCR (viz obr. 1), tyto výsledky byly veřejností kladně přijaty. Byli vůbec první kdo testoval SEE za použití těžkých iontů [3]



Obrázek 1: Stopy těžkých iontů zanechané ve fotografické emulzi (převzato z [3])

2.3 Historie SEU ve vesmíru

Doposud byly zmiňovány pouze některé incidenty SEE, které byly pozorovány v kosmu. Bylo jich však mnohem více, do roku 1983 více než 40 satelitních systémů bylo poškozeno vlivem SEE. tab. 1 ukazuje některé z neklasifikovaných systémů. Jedno konkrétní zařízení se stalo slavným, lépe řečeno nechvalně slavným, díky jeho neobvykle veliké míře upsetů za dobu, po kterou bylo ve vesmíru. Konkrétně se bavíme o čísle 93 422. Toto zařízení bylo zodpovědné za upsety, které se objevily v TDRS, LANDSAT a DSCD, potenciální latch-upy v tomto zařízení také způsobily velký redesign satelitu Galileo. Dále také dalo vzniknout slavné větě jež řekl nejmenovaný inženýr NRL „I know that you warned me I would have upsets, but I did not expect an upset in that bit“ [3].

Tabulka 1: SEU v satelitech zaznamenány v letech 1970 - 1982 (převzato a upraveno z [3])

Intelsat IV	TTL flip-flop
Voyager	CMOS paměť
Pioneer Venus	TL RAM, PMOS shift Registr
TIROS-N	Potenciální CMOS RAM latchup
DMSP	NMOS paměť
SDS	64 bit TTL Schottky RAM
GPS	NMOS paměť
SMM	Rychlá bipolární paměť
Landsat D	Paměť a potenciální CMOS latchup
Galileo	Potenciální CMOS PROM latchup
LES 8 a LES9	TTL flip-flop

3 Ionizující záření

Pod pojmem záření (radiace) chápeme procesy, při kterých dochází k přenosu energie prostorem a to buď ve formě hmotných částic nebo ve formě elektromagnetického záření.

Záření mohou být ionizující, nebo také neionizující, to záleží na tom jak dané záření ovlivňuje hmotu, kterou prochází. Mezi neionizující záření patří rádiové vlny, mikrovlny, teplo a také viditelné světlo. Toto záření sice s materiály jež prochází provede jistou interakci, ale nemá dostatečnou energii k tomu, aby rozštěpilo molekulární vazby a vybudilo tak elektrony z atomů. V přírodě se můžeme setkat se zářením převážně z radiovln, ty se vyskytují za bouřích a na čele studených front. V průmyslu se můžeme setkat s radiovlnami a mikrovlnami v rádiovém rozhlasu, vysílání televize a některých domácích spotřebičích. Nás ovšem zajímá ionizující záření, nejdříve si však zavedeme pojem ionizace [5].

Ionizace je proces, při kterém se z elektricky neutrálního atomu nebo molekuly stává iont a to buď kladně, nebo záporně nabitý. Záporně nabité ionty vzniknou tak, že se dodá záporný elektrický náboj (jeden nebo i více elektronů) do elektronového obalu atomu. Kladně nabité ionty zase naopak vznikají odebráním jednoho (nebo více) elektronu z obalu atomu [4].

Ionizující záření je souhrnné označení pro všechna záření, jehož kvanta mají dostatečnou energii na to, aby podél své dráhy přímo či nepřímo odtrhovaly elektrony z elektronového obalu atomů. Energie potřebná k uvolnění takového elektronu z obalu se pohybuje v rozmezí 5 až 25 eV. Hlavní veličinou tohoto záření je energie, zde vyjádřená raději v elektronvoltech (eV) než v Joulech (J). Elektronvolt je jednotka práce a energie mimo soustavu SI. Odpovídá kinetické energii, kterou získá elektron urychlený ve vakuu napětím jednoho voltu. Platí převodní vztah $1 \text{ eV} = 1,60219 \cdot 10^{19} \text{ J}$ [4].

3.1 Druhy ionizujícího záření

Podle charakteru dělíme ionizující záření na

- přímo ionizující záření
- nepřímo ionizující záření

Podle částic dělíme ionizující záření na

- elektromagnetické, fotonové – rentgenové záření, záření gamma
- korpuskulární – elektrony, pozitrony, neutrony, produkty štěpení jader

3.1.1 Přímá a nepřímá ionizující záření

Přímá ionizující záření je tvořeno nabitými částicemi, jež mají dostatečně velkou energii, aby mohly způsobit ionizaci, mezi tyto částice patří například elektrony, protony, alfa a beta částice. Takovýto typ záření tvoří proud elektricky nabitých částic [4].

Nepřímá ionizující záření tvoří částice jako jsou fotony, neutrony apod., které samy o sobě nezpůsobí ionizaci prostředí, ale při kontaktu s prostředím uvolní sekundární přímo ionizující nabitě částice. Tyto nabitě částice (zpravidla elektrony) poté způsobí samotnou ionizaci [4].

3.1.2 Elektromagnetické a korpuskulární záření

Korpuskulární záření je představováno proudem částic. Jde o tok částic (hmotných), jež si zachovávají svou existenci i po skončení pohybu. Tyto částice se třídí do několika kategorií a to podle jejich hmotnosti.

- lehké - elektrony
- středně těžké - mezony
- těžké - alfa částice, protony a neutrony

Elektromagnetické záření (vlnové) oproti korpuskulárnímu záření při záměrnému brždění odevzdá veškerou svou energii a poté zanikne. Třídí se dále (jak již bylo zmíněno v kap. 3.1) na rentgenové záření a záření gamma. V podstatě se jedná o stejný druh záření (viz. kap. 3.2.3 a 3.2.4) [4].

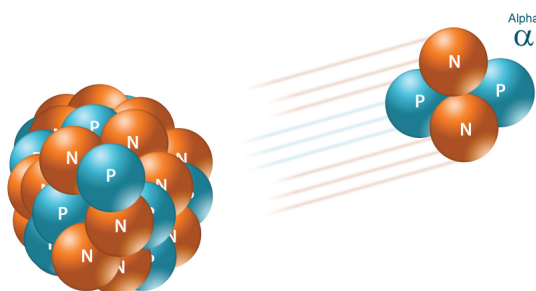
3.2 Vlastnosti jednotlivých druhů záření

V této podkapitole bude rozebráno několik základních typů ionizujícího záření. Abychom mohli pochopit účinky těchto záření na elektronické součástky (myšleno ve vesmíru), je nejprve nutné pochopit, jak funguje radiační prostředí a jak tato záření reagují s určitými materiály. Bude zde naznačena interakce s látkovým prostředím, rozptyl, absorpce či konverze na jiné druhy záření.

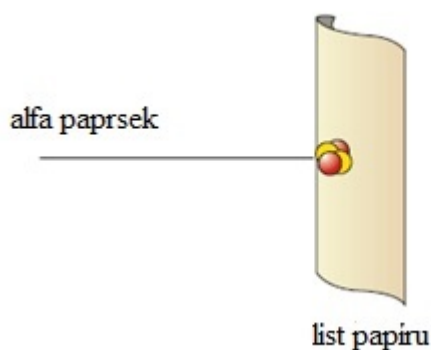
3.2.1 Záření alfa

Alfa záření patří pod korpuskulární záření. Je tvořeno z těžkých, kladně nabitých částic vysílanými atomy prvků, jedná se zejména o radium a uran. Alfa částice jsou schopny dosáhnout veliké rychlosti, ale také velice rychle ztrácejí energii a proto je lze velice snadno zastavit například jak je vidět na obr. 3 jediným listem papíru. Ve vesmíru (vakuum) se

jádra helia mohou šířit neomezeně. Alfa záření je nejčastěji popisováno jako prudce letící kladné jádro helia ${}^2\text{He}^4$ (helion), jež obsahuje dva protony a dva neutrony jak je vidět na obr. 2. Alfa záření má čárové energetické spektrum, to vyjadřuje, že energie jednotlivých alfa částic je schopna nabývat jen určitých hodnot, které jsou pevně dané pro každý druh jádra. Částice alfa má značně velkou hmotnost a nese dva kladné elementární náboje. Ionizační ztráty jsou velice výrazné při průchodu materiálem, až polovina energie se ztratí při ionizaci a zbytek je výsledkem excitace[7].



Obrázek 2: Alfa záření (převzato z [11])

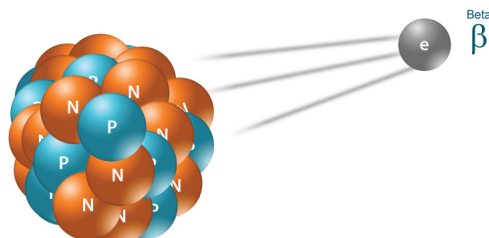


Obrázek 3: Zastavení alfa záření listem papíru (převzato z [4])

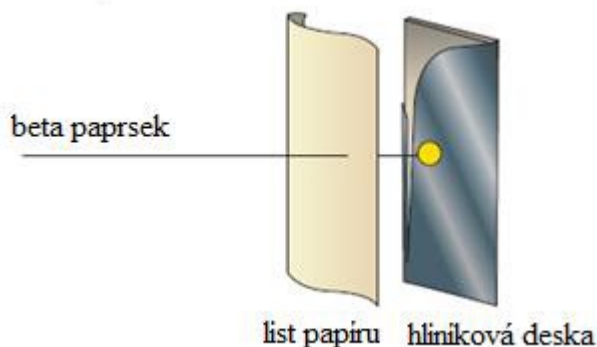
3.2.2 Záření beta

Beta záření je dvojího druhu (pozitivní a negativní) a patří také do podskupiny korpuskulárního záření, vyznačuje se tak, že jeho částicemi je proud elektronů β^- , nebo pozitronů (neboli antielektronů) β^+ viz. obr. 4. Oproti alfa záření je mnohem více pronikavé, ale je

možné ho zastavit deskou tvořenou hliníkem a to o tloušťce několika milimetrů, znázorněno na obr. 5, několika centimetry vody, ve vzduchu je beta záření zastaveno po několika metrech. Ve vesmíru stejně jako alfa záření se i beta záření šíří neomezeně[8].



Obrázek 4: Beta záření (převzato z [11])



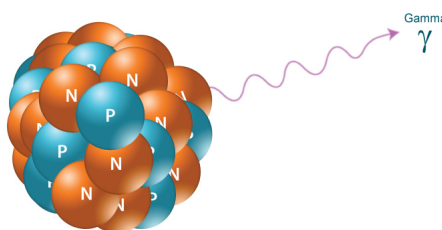
Obrázek 5: Zastavení beta záření hliníkovou deskou (převzato z [4])

3.2.3 Gama záření

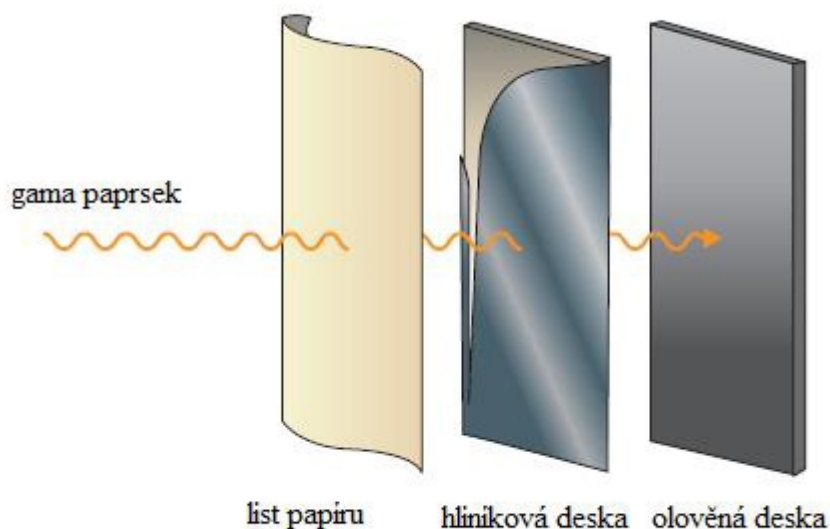
Gama záření naruší od záření alfa nebo beta nenesou žádné částice, místo toho se jedná pouze o ztrátu energie jádra. Gama částice jsou vysoce energetické fotony (obr. 6), jsou schopné proniknout hluboko a není snadné je zastavit, papírem i hliníkovou deskou gama záření projde bez obtíží a zastavit jej lze až deskou z olova tlustou zhruba 5 centimetrů nebo také stěnou z betonu viz. obr. 7. Na vzduchu gama záření urazí až stovky metrů. Ve vesmíru se gama záření opět šíří neomezeně [4].

Gama záření je schopné projít většinou elektrického vybavení, jednoduché stroje (motory, přepínače, vinutí) jsou vůči záření odolné a skoro nikdy nevykazují žádné poruchy a

to dokonce i když jsou vystaveny záření dlouhodobě. Diody a počítačové čipy (elektronika obecně) jsou oproti tomu mnohem více citlivější na gama záření. Pro srovnání, dávka 5 Sv (Sievert: jednotka ekvivalentní dávky ionizujícího záření) způsobí smrt většině lidí, elektronika vykazuje mírné poruchy až při dávce 50 až 100 Sv, z tohoto důvodu některá elektronika bývá chráněna proti gama záření a to použitím materiálů odolným vůči radiaci. Některá elektronika vykazuje návrat do původního stavu po tom co byla radiací vystavena, naneštěstí návrat do původního stavu není nikdy 100%. Za zmínku také stojí, že pokud elektronika v době vystavení záření není zrovna zapnutá, tak efekt ozáření gama zářením je menší. Ionizující záření ničí materiály pro elektrotechnická zařízení, například když necháme elektrické vedení vystavit gama záření, nenalezneme žádné změny dokud jej nezačneme ohýbat. Izolace se stane křehkou a popraská a tím se způsobí veliké škody na zařízení. Tento efekt na diodách a čípech je mnohem více komplexnější, gama záření naruší krystalickou mřížku uvnitř elektronických komponent. Funkce těchto zařízení je tím značně omezena a selhání jsou tím větší, čím déle jsou tyto součástky vystaveny gama záření. Gama záření nemá žádný efekt na signály v zařízení, ani na signály přijímané zařízením[6].



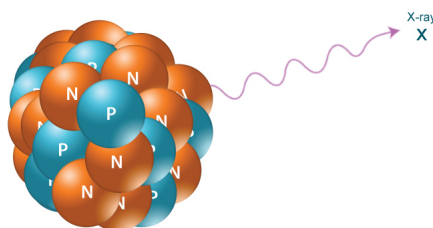
Obrázek 6: Gama záření (převzato z [11])



Obrázek 7: Zastavení gama záření olověnou deskou (převzato z [4])

3.2.4 Rentgenové záření

Rentgenové záření je velice podobné záření gama, hlavní rozdíl je v mechanismu vzniku záření, rentgenové záření totiž pochází z procesů mimo jádro, z takzvaného elektronového mraku (obr. 8). Obecně je způsobeno změnou energie v elektronu jako je přechod z jedné energetické hladiny na jinou, přebytečná energie je vyzářena ve formě rentgenového záření. Stejně jako gama záření se jedná o záření neopřímo ionizující. Rentgenové záření má delší vlnovou délku a také nižší energii, než gama záření. Jedná se o vlnovou délku v rozsahu 10^{-9} až 10^{-13} metru [11].



Obrázek 8: Rentgenové záření (převzato z [11])

Energie fotonu je dána vztahem

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}, \quad (1)$$

kde h je Planckova konstanta ($6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s), c je rychlost elektromagnetického záření ve vakuu ($3 \cdot 10^8$ m/s), λ je vlnová délka záření.

Pro rentgenové a gama záření rozeznáváme tři různé typy interakce s látkou, které se dělí následovně:

- Fotoelektrický jev

Fyzikální jev, při kterém dochází k uvolňování (vyzáření) elektronů z látky (obvykle kov) v důsledku absorpce elektromagnetického záření danou látkou. Tyto elektrony jež jsou uvolněné z jaderného obalu jsou značeny jako fotoelektrony. Fotoelektrický jev nastane pokud se celá energie gama záření předá některému elektronu z elektronového obalu atomu absorbujícího materiálu, popřípadě některému volnému elektronu. Část energie je potřebná k uvolnění elektronu a zbytek se přemění na kinetickou energii vzniklého fotoelektronu. Foton záření gama takto zanikne a vzniklý fotoelektron jež přebírá jeho energii nadále ionizuje své okolí. Na místo po uvolněném elektronu přechází elektron z vyšší energetické hladiny [13].

- Comptonův rozptyl

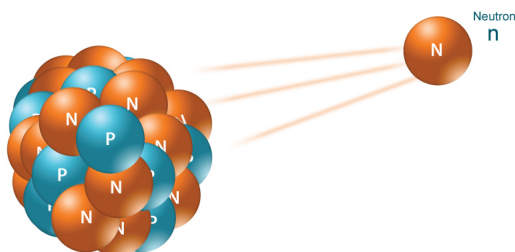
Podle myšlenky korpuskulárně vlnového charakteru částic pro vysvětlení fotoelektrického jevu, je možné pokládat foton zároveň za vlnění i částici. Při případné srážce například s elektronem by došlo k interakcím, jež by svým charakterem vykazovali stejné podmínky jako pružné srážky, při níž dochází k zachování celkové energie a hybnosti v rámci izolované soustavy. Podle klasické fyziky by při takové srážce fotonu a elektronu měl být elektron rozkmitán na takovou frekvenci, jako má dopadající foton a následně vyslat fonoty opět se stejnou frekvencí. Tuto teorii prověřil Arthur Holly Compton v roce 1922. Experiment byl proveden s rozptylem rentgenového záření na volných elektronech. Rentgenové záření dopadalo na uhlíkový terčík. Byli zachyceny zdvojené spektrální čáry, přičemž první odpovídala vlnové délce původního záření, druhá vlnová délka byla vyšší. Teoreticky dochází ke Comptonovu rozptylu při každé interakci fotonu a elektronu, nicméně hmotnost fotonu je velmi malá vzhledem ke hmotnosti elektronu, a tak je tento rozptyl minimální. Vzhledem k tomu je možno Comptonův rozptyl pozorovat jen za použití rentgenového nebo gama záření, protože tato záření vykazují velkou hmotnost fotonů [12].

- Tvorba elektron-pozitronových párů

Při energiích fotonů nad 1,02 MeV (v praxi značně vyšších) dojde k přeměně fotonu na pozitron a elektron, přitom je ale podmínkou aby se tak stalo v blízkosti atomového jádra nebo jiné částice, který by mohla převzít část hybnosti fotonů, protože hybnost elektronu a pozitronu je nižší. K této přeměně nemůže dojít svévolně, jelikož by nebyl zachován zákon o zachování hybnosti. Jedná se o energeticky nejvyšší interakci gama záření ze všech vyjmenovaných [14].

3.2.5 Neutronové záření

Neutronové záření je složeno z volných neutronů, nejčastěji emitováno v důsledku indukovaného, či spontánního jaderného štěpení (obr. 9). Neutrony jsou částice jež nenesou žádný náboj a přímo ionizaci nezpůsobují. Obvykle jsou absorbovány do stabilního atomu a tím jej učiní nestabilním, takto nestabilní atom poté pravděpodobněji emituje ionizující záření jiného typu. Tato interakce pak může vyvolat alfa, beta, gama i rentgenové záření. Neutronové záření je jediný typ záření jež je schopno měnit ostatní materiály v radioaktivní. Neutronové záření je schopno ve vzduchu urazit stovky metrů, dokonce kilometrů, nicméně dá se snadno zastavit látkami bohatými na vodík, například vodou, znázorněno na obr. 10. Stejně jako všechna ostatní záření se ve vesmíru může šířit neomezeně[11].



Obrázek 9: Neutronové záření (převzato z [11])



Obrázek 10: Zastavení neutronového záření pomocí vody (převzato z [4])

3.2.6 Kosmické záření

U kosmického záření rozlišujeme dva různé původy záření, jedná se energetické částice z vesmíru obecně (galaktické kosmické záření GCR) a záření ze slunce (SCR) a obecně je můžeme klasifikovat na:

1. Galaktické kosmické záření tvořeno vysoce energetickými částicemi (25 MeV - 20 GeV) všech atomových čísel, které jsou vyzařovány do kosmického prostoru pokaždé když se hvězda mění v supernovu, pochází tedy ze zdrojů mimo sluneční soustavu. Přibližně 88% tvoří vodík, 10% je tvořeno heliem a zbytek jsou pozůstatky ostatních atomů všech známých prvků [15].
2. Sluneční kosmické záření, které se dále dělí na dvě kategorie, nízko energetické sluneční větry, které jsou neustále vyzařovány ze slunce (obecně považovány za neškodné) a vysoce energetických částic ze slunečních erupcí (solar particle events SPE). Tyto erupce mají efekt pouze na malé oblasti ve vesmíru, ale jsou charakterizovány velmi vysokým tokem částic, který může být extrémně nebezpečný pro vesmírné systémy a také pro posádku ve vesmírných plavidlech [15].
3. Van Allenovy radiační pásy. Magnetické pole země, generováno pohybem zemského jádra, sbírá a zachycuje SCR a nízkoenergetické GCR a vytváří tak pásy. Van Allenovy pásy se nacházejí zhruba od výšky 400 km nad povrchem země až do vzdálenosti 50 000 km. Dělíme je na vnitřní protonový (400 - 3 000 km) a vnější elektronový (15 000 - 50 000 km). Pásy obklopují zemskou kuli symetricky okolo její magnetické osy, mají tvar půlměsíce. Pro většinu částic je nemožné těmito pásy projít, zhušťující se křivky způsobují efekt magnetického zrcadla, částice jsou tak uvězněny mezi těmito

pásky a odraží se tam a zase zpět. Částice jsou takto dlouhodobě zdrženy a k jejich nejvyšší koncentraci dochází právě nad rovníkem [4, 15].

3.3 Fyzikální veličiny popisující záření

V této podkapitole budou uvedeny základní fyzikální veličiny, jež popisují ionizující záření, včetně jednotek a jsou tak důležité k jeho plnému pochopení. Prakticky při popisu dějů probíhajících na částicové úrovni používáme jako jednotku elektronvolt, $1 \text{ eV} = 1,60219 \cdot 10^{19} \text{ J}$. Sondy a družice se ve vesmírném prostoru pohybují v prostředí, kde energie částic dosahuje i jednotek vyšších než 100 MeV.

1 Aktivita zdroje (intenzita záření)

Definice veličiny: Počet radioaktivních přeměn vztažených na jednotku času dt

$$A = \frac{dN}{dt}, \quad (2)$$

kde dN je počet samovolných přeměn v materiálu jež je radioaktivní, ke kterým dojde za časový interval dt .

Jednotka SI: 1 Bq (Becquerel) [1 Bq = 1 s⁻¹]

Jeden Bq značí rozpad jedné částice na 1 s.

1.1 Měrná aktivita zdroje (měrná intenzita záření)

Definice veličiny: Aktivita vztažená na jednotku hmotnosti radioaktivního materiálu

$$a = \frac{A}{m}, \quad (3)$$

kde A je aktivita zkoumaného vzorku materiálu jež je radioaktivní a m je hmotnost tohoto vzorku.

Jednotka SI: 1 Bq/kg [1 Bq.kg⁻¹ = 1s⁻¹kg⁻¹]

1.2 Plošná aktivita zdroje

Definice veličiny: aktivita vztažená na jednotku plochy radioaktivního materiálu

$$a_S = \frac{A}{S}, \quad (4)$$

kde A je aktivita zkoumaného vzorku materiálu jež je radioaktivní a S je plocha tohoto vzorku.

Jednotka SI: 1 Bq/m² [1 Bq.m⁻² = 1 s⁻¹m⁻²]

1.3 Objemová aktivita

Definice veličiny: aktivita vztažená na jednotku plochy radioaktivního materiálu

$$a_V = \frac{A}{V}, \quad (5)$$

kde A je aktivita zkoumaného vzorku materiálu jež je radioaktivní a V je objem tohoto vzorku.

Jednotka SI: 1 Bq/m³[1 Bq.m⁻³= 1 s⁻¹m⁻³]

2 Tok (fluence) částic

Definice veličiny: Počet částic dN , emitovaných v důsledku rozpadu radioaktivního materiálu, který vstoupí do koule o ploše hlavního řezu da

$$\Phi = \frac{dN}{da}, \quad (6)$$

kde Φ je tok částic, dN vyjadřuje počet částic a da je aktivní plocha, na kterou částice dopadly. Tok částic charakterizuje pole ionizujícího záření, jež se nachází kolem zdroje záření.

Jednotka SI: 1/m²=m⁻²

2.1 Hustota toku částic

Definice veličiny: Počet částic dN , emitovaných v důsledku rozpadu radioaktivního materiálu, který vstoupí do koule o ploše hlavního řezu da , za jednotku času dt

$$\Phi = \frac{dN}{da \cdot dt}. \quad (7)$$

Jednotka SI: 1/m²s

Spíše se používají jednotky: 1/cm²min popř 1/cm²s

3 Tok (fluence) energie

Definice veličiny: Součet energií (mimo klidových energií) dE , všech N částic emitovaných v důsledku rozpadu radioaktivního materiálu, který vstoupí do koule o ploše hlavního řezu da

$$\Psi = \frac{dE}{da}. \quad (8)$$

Jednotka SI: 1 J/m²

3.1 Hustota toku energie

Definice veličiny: Součet energií (mimo klidových energií) dE , všech N částic emitovaných v důsledku rozpadu radioaktivního materiálu, který vstoupí do koule o ploše hlavního řezu da , za jednotku času dt

$$\Psi = \frac{dE}{da \cdot dt}. \quad (9)$$

Jednotka SI: 1 J/m²s

4 Dávka (dose)

Definice veličiny: Střední energie přenesená ionizujícím zářením látky v objemovém elementu o hmotnosti dm

$$D = \frac{dE}{dm}, \quad (10)$$

kde dE je střední energie ionizujícího záření, jež je absorbována na látce a dm je její hmotnost.

Jednotka SI: 1 Gy (Gray) [1 Gy = 1 J/kg]

Spíše se používají jednotky: 1 mGy = 10⁻³Gy a 1 μGy = 10⁻⁶Gy

Starší jednotka: rad, platí 100 rad = 1 Gy

4.1 Dávkový příkon

Definice veličiny: Přírůstek střední energie přenesená ionizujícím zářením látky v objemovém elementu o hmotnosti dm , za jednotku času dt

$$D^* = \frac{dD}{dt} = \frac{dE}{dm \cdot dt}. \quad (11)$$

Jedná se o přírůstek dávky dD za jednotku času dt .

Jednotka SI: Gy/s, spíše se používá 1 Gy/h.

5 KERMA (Kinetic Energy Released in Material)

Definice veličiny: Součet počátečních kinetických energií všech nabitých částic uvolněných nenabitými ionizujícími částicemi v uvažovaném objemu látky o hmotnosti dm

$$K = \frac{dE_K}{dm}. \quad (12)$$

Pro kermu se používá stejná jednotka jako pro absorbovanou dávku tudíž 1 Gy. Kerma je používána v souvislosti s nepřímo ionizujícím zářením. Za podmínky rovnováhy nabitých částic je kerma rovna absorbované dávce D .

6 Expozice

Definice veličiny: Absolutní hodnota celkového náboje všech iontů jednoho znaménka dQ , vytvořených ve vzduchu při úplném zabrzdění všech elektronů, které jsou uvolněny z vazeb v objemovém elementu o hmotnosti dm , prostřednictvím interakce s fotony nepřímo ionizujícího záření

$$X = \frac{dQ}{dm}. \quad (13)$$

Jednotka SI: 1 C/kg

Starší jednotka: 1 R (rentgen) [1 R = $2,58 \cdot 10^{-4}$ C·kg⁻¹]

6.1 Příkon Expozice

Definice veličiny: Přírůstek expozice X za jednotku času dt .

$$\frac{dX}{dt} = \frac{dQ}{dm \cdot dt}. \quad (14)$$

Jednotka SI: 1 A/kg

Starší jednotka: 1 R/h

7 Ekvivalentní dávka

Definice veličiny: Ekvivalentní dávka je absorbovaná dávka D ve sledovaném bodě ve tkáni, redukována z hlediska radiační hygieny jakostním (váhovým) faktorem Q , případně dalšími modifikujícími faktory, jejichž součin se označuje N , která vystihuje účinky ionizujícího záření na biologické organismy

$$H = D \cdot Q \cdot N. \quad (15)$$

Jednotka SI: Sv (Sievert) [1 Sv = 1 J·kg⁻¹] pro dávku měřenou v Gy

Starší jednotka: 1 rem [1 rem = 0,01 Sv] pro dávku měřenou v rad

7.1 Příkon ekvivalentní dávky

Definice veličiny: Přírůstek ekvivalentní dávky za jednotky času dH/dt .

Jednotka SI: 1 Sv/s nebo 1 Sv/hod.

8 Dráhový úbytek energie (lineární přenos energie, LET, Linear Energy Transfer)

Definice veličiny: Dráhový úbytek energie je poměr střední energii předané látce prolétající částicí ke vzdálenosti, kterou prošla tato částice. Jednotkou lineárního přenosu

energii je J/m , často se užívá jednotka keV/ μm

$$L = \frac{dE}{dx}, \quad (16)$$

kde dE je energie, která byla odevzdaná nabitou částicí při průchodu po dráze o délce dx

Veličina LET tedy udává energii, kterou nabitá částice uvolní na jednotkové dráze v zasaženém materiálu, ve spojení s danou součástíkou popisuje její funkční prahový limit k pohlcení energie nabité částice. Radiace s hodnotou LET <10 keV/ μm je obecně považováno za nízké LET (gama a rentgenové záření – potřebuje delší dráhu na ztrátu energie). Vysoké LET je u neutronového, alfa a kosmického záření (ztratí energii na krátké dráze) [4].

4 Definice SEE

Single Event Effects (SEEs) jsou vyvolány interakcí ionizující částice s elektronickými součástkami. Ionizující částice mohou být primární (například těžké ionty) v prostředí vesmírného prostoru nebo alfa částice vyrobené radioaktivním izotopem, nebo sekundární (zbytek po srážce) vytvořené jadernou interakcí částice, jako je neutron nebo proton, s křemíkem. SEEs se mohou vyskytnout, když se shromažďují frakce náboje uvolněného ionizující částicí a tento náboj je větší než elektrický náboj uložen na citlivém uzlu. Citlivý uzel je definován jako uzel v obvodu, jehož elektrický potenciál, může být upraven pomocí vnitřní injekce nebo sběrem elektrických nábojů [1].

Dnes jsou SEE považovány za důležitý faktor, který silně omezuje spolehlivost a dostupnost elektronických systémů, a je vynakládáno bohaté úsilí v oblasti výzkumu a vývoje, stejně tak je kladen důraz k bádání i na akademické půdě. Tyto studie zahrnují širokou oblast fyziky, jako je přírodní radiace / zaření v prostředí, radiační interakce mechanismů, iontové energie, depozice v izolátorech a polovodičích, transport náboje a shromažďování v elementárních polovodičových součástkách, jako jsou PN přechody nebo elementární MOS tranzistory. Tyto studie zahrnují také elektronické inženýry, kteří analyzují mechanismy poruch a efekty v různých buňkách (brány, flip-flops, registry, a paměťové buňky), poruchové vlivy ve složitých integrovaných obvodech s možností více chyb a Single Event Functional Interrupt (SEFI). Projektanti musí také zvážit analogové komponenty buď CMOS nebo bipolární, které mohou být také problematické (operační zesilovače, regulátory, komparátory, oscilátory). A konečně, systém level inženýři musí zkoumat globální dopady jednotlivých efektů na elektronické systémy a rozvíjet zmírňující techniky a testovat různé metody, aby vytvořili a ověřili robustnost těchto systémů [1].

Cílem jejich práce je popsat fyzikální mechanismus, který indukuje SEEs, definovat a klasifikovat různé způsoby, které mění funkci obvodu. Fyzika pevných látek a fyzika polovodičů je důležitá za účelem vytvoření přechodného fotoelektrického modelu související se sběrem nosičů ve spojích. Hrozbou pro elektroniku ve vesmíru jsou vysoce nabitě částice, vyskytující se ve vesmírném prostoru, ty mohou prorazit obal integrovaného obvodu a způsobit tak SEE. Tyto částice pochází ze třech různých zdrojů a to: Slunce, konkrétně sluneční vítr, dalším zdrojem jsou galaktické kosmické záření, které má velmi vysokou energii, posledním zdrojem jsou radiační pásy, vyskytující se kolem každé planety s magnetosférou. Pozemní hrozbou jsou hlavně radioaktivní nečistoty, v avionice jsou to zase

neutrony produkované vesmírným zářením, ty při kontaktu s dusíkem způsobují SEE [1].

4.1 Základní procesy

1. Generování náboje: dopadající iont reaguje s materiálem a produkuje tak volné nosiče náboje (elektrony a díry).
2. Rekombinace a sběr náboje: elektrony a díry se pohybují pomocí difúze a driftu skrz materiál (oxidy a polovodiče) až k citlivému uzlu zatímco také rekombinují.
3. Reakce obvodu: Přidaný náboj na uzlu mění napětí, což okamžitě vede k SEE, takové napěťové závady se mohou dále šířit obvodem.

Generování náboje Iont narazí do materiálu a vytvoří tím volný nosič náboje, dělíme na tři druhy.

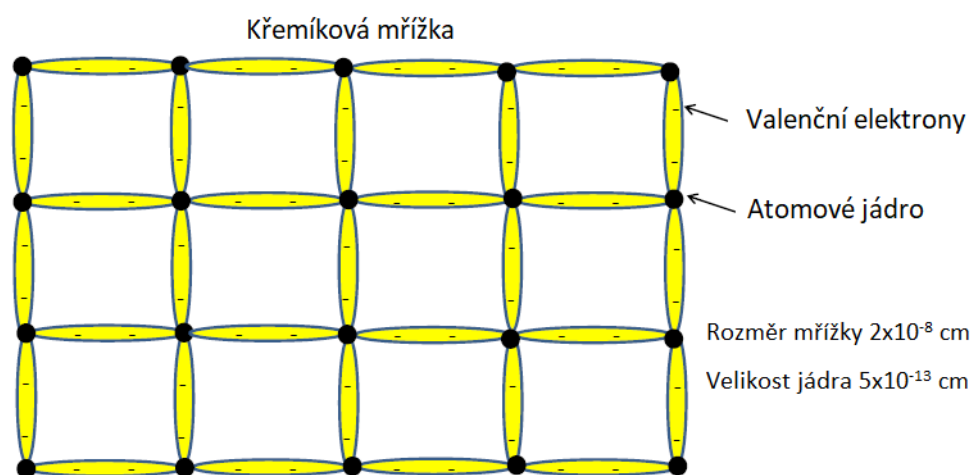
A. Pružný Coulombův rozptyl Nastává mezi iontem a vázaným elektronem daného materiálu.

B. Pružný Coulombův jaderný rozptyl Nastává mezi iontem a jádrem daného materiálu.

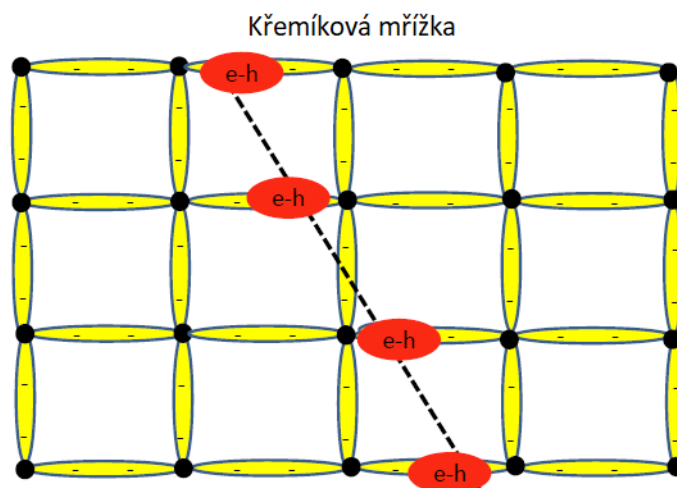
C. Nepružný rozptyl Nastává mezi iontem a jádrem daného materiálu.

Rekombinace a sběr náboje Pohyb náboje je řízený buď driftovým proudem (pokud se jedná o elektrické pole) nebo difúzním proudem (pokud není žádné pole). Rekombinace elektronů a děr nastane ve stejnou chvíli díky Augerovu jevu nebo rekombinaci Shockley-Read-Hall. Náboj pohybující se k citlivému uzlu (drain u MOS tranzistorů) je ekvivalentní k proudu v daném uzlu. Přechod proudu má rychlé (drift ve vyčerpané oblasti) a pomalé (difúze) složky. Celková hodnota nahromaděného náboje se rovná ploše pod křivkou časového průběhu proudu (obr. 13).

Interakce dopadajícího iontu s hmotou

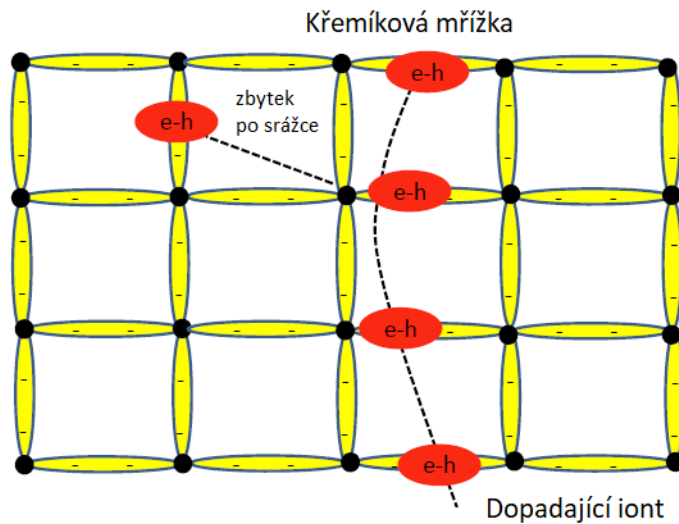


Elastický rozptyl mezi dopadajícími ionty a vázanými elektrony



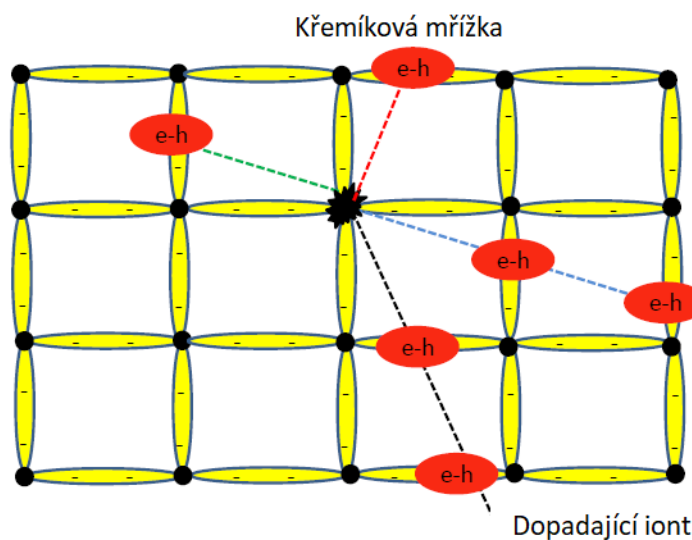
Obrázek 11: Interakce dopadajícího iontu s hmotou 1/2 (převzato a upraveno z [16])

Elastický rozptyl - Coulombův rozptyl jádra



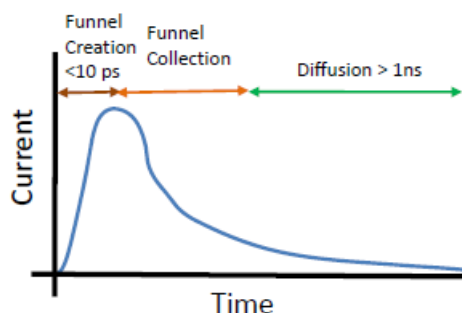
-Dopadající částice i zbytky po srážce mohou produkovat páry elektron-díra
-Účinný průřez je mnohem menší než u přímé ionizace

Neelastický rozptyl



-Coulombova bariéra pro proton/Si je cca 2 MeV
-Protony obvykle produkuje SEU díky jaderné interakci

Obrázek 12: Interakce dopadajícího iontu s hmotou 2/2 (převzato a upraveno z [16])



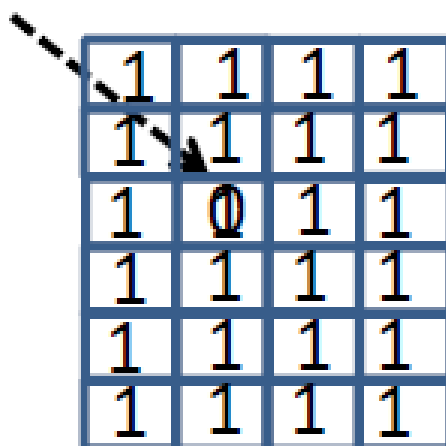
Obrázek 13: Integrál pod křivkou proudu je roven nahromaděnému náboji (převzato z [16])

SEE nastave pokud $Q_{coll} = LET \cdot (d + f) > Q_{crit}$ v čase kratším než je reakční doba obvodu. Průtok náboje k uzlu závisí na faktorech jako je mobilita děr, zachycení náboje a urověň dotace [16].

Reakce obvodu Obvod a součástky obecně mohou na předchozí jevy reagovat rozdílně, v následující podkapitole jsou popsány jednotlivé druhy SEE.

4.2 Single Event Upsets

Single Event Upsets (SEUs) je nejčastěji se vyskytujícím jevem SEE, vyskytují se v pamětech (SRAM, SDRAM) a registrech (flip / flops). SEU jsou nedestruktivní, lze se také setkat s označením “single bit-upset”. SEU je změna uložené hodnoty (bitu) v paměti. Projeví se tak, že se z uložené 1 stane 0 a naopak (viz. obr. 14). Tato chyba může být odstraněna přepsáním původní informace. SEU mohou způsobit vážné poškození systému, nebo se nemusí projevit vůbec. V praxi se SEU většinou nazývá „slabý proudový impulz“. Do PN přechodu polovodiče vnikne rychlá částice a způsobí tak krátký proudový impulz (jednotky ns). Silný proudový impulz by mohl způsobit nenávratnou ztrátu informace, avšak slabý proudový impulz nezpůsobí téměř žádné problémy a po přepsání dat lze uvést součástku do původního stavu. Naneštěstí zmenšování součástek nepřímou úměrou zvyšuje jejich citlivost a tak proudový impulz může být způsoben pouze energií zachycených protonů namísto těžkých iontů, jak tomu bylo dříve [1, 16].



Obrázek 14: Single Event Upset (převzato z [16])

4.2.1 Multiple Bit Upsets

Multiple Bit Upsets (MBUs) obsahují několik SEU, které jsou způsobené jedinou částicí. MBU se vyskytují skrze šíření náboje, nebo skrz křížení cest více než jednoho uloženého náboje. Na 16 Mbit DRAM je jediná částice schopná vytvořit více než 50 SEU. Oproti SEU, je MBU mnohem těžší zmírnit, nebo opravit. Poruchy způsobené MBU jsou pro systém mnohem více kritické než SEU, protože pro opravu těchto vícenásobných chyb nemusí stačit ani standartní kódy pro opravu. Pro vyvarování se MBU v pamětech se používá fyzické rozdělení bitu v jednom slově [1].

4.3 Single Event Transients

Single Event Transients (SETs) jsou napěťové závady v obvodech, způsobené jednotlivými ionty. Jedná se o hromadění náboje na citlivém uzlu v logických obvodech, dokud tato hodnota nepřekročí referenční úroveň, nic se neděje. Pokud však referenční úroveň překročí, způsobí impulz, který může být chápán jako nová informační hodnota. Je patrné, že stejně jako SEU může ovlivnit uložené hodnoty, avšak nedosahuje toho přímo, ale kupříkladu přivedením impulzu způsobeného SET na klopný obvod během hodinového impulzu. SET lze předejít dostatečně vysokou referenční úrovní napětí, které by tento impulz nedosáhl. Naneštěstí se neustále snažíme o co nejmenší napájecí napětí a tím i nízké referenční úrovně napětí, že je stále těžší a těžší tento falešný impulz rozeznat. SET se v praxi obvykle nazývá „řetězový proudový impulz“. SET se dělí na dvě oblasti a to Analog Single Event Transient (ASET) a Digital Single Event Transient (DSET) [1].

4.3.1 Analog Single Event Transient

ASET se vyskytuje v analogických zařízeních jako jsou operační zesilovače, komparátory apod.. Nejvíce náchylné je Darlingtonovo zapojení bipolárních tranzistorů.

4.3.2 Digital Single Event Transient

DSET se vyskytuje v digitálních zařízeních například v kombinační logice, hradla AND a OR, dále v pamětech apod.

4.4 Single Event Functional Interrupt

Single Event Functional Interrupt (SEFI) je druh SEU, který způsobuje, že obvod přestane fungovat, SEFI se vyskytuje v registrech, které kontrolují konfiguraci, například procesory, SDRAM a FPGA. Je způsoben jedinou částicí stejně jako v případě SEU, naneštěstí odhalit SEFI je náročnější, v případě paměti jej lze dokonce se SEU zaměnit, odhalit lze pouze dlouhodobým pozorováním (chyba se projevuje stále na té samé adrese). SEFI se odstraní pouze přepsáním původní informace a to buď přeprogramováním (hard reboot), nebo restartováním (soft reboot) poškozeného zařízení. SEFI je mnohem vážnější problém než SEU [1].

4.5 Single Event Latch-up

Single Event Latch-up (SEL) způsobuje tzv. „hard errors“. SEL vznikají díky parazitním PNP, nebo NPN tranzistory v integrovaných obvodech typu CMOS, tyto tranzistory pak způsobí přivedení napájecího napětí na zem a následný zkrat součástek. Díky tomuto zkratu a nevhodnému zásahu zvětší může dojít k nadměrnému přehřátí součástek a následnému zničení. Pokud se ovšem zasáhne dostatečně rychle, SEL nemusí být destruktivní. V praxi se SEL nazývá „silný proudový impulz“ [1].

4.6 Single Event Burnout

Single Event Burnout (SEB) se vyskytuje převážně ve výkonových tranzistorech MOSFET, IGBT a také v bipolárních výkonových tranzistorech. V případě SEB se jedná o destruktivní SEE, je vyvolána průchodem těžkého iontu přes oblast elektrody Source (S), dále oblastí N⁺ až do elektrody Drain (D). Tento iont za sebou zanechává stopu tvořenou páry elektron-díra, následně kvůli značnému navýšení proudu vznikne na této stopě dráha, kterou vytvoří skrat mezi Source a Drain [1].

4.7 Single Event Gate Rupture

Single Event Gate Rupture (SEGT) opět nastává v tranzistorech typu MOSFET. Vyznačuje se zhroucením dielektrika a jedná se o jev destruktivní [1].

4.8 Single Event Snapback

Težké ionty indukují tzv. snapback v zařízeních typu CMOS, poprvé byl tento jev objeven v laboratoři LBNL v 88 palcovém cyclotronu. Vysoká hodnota proudu může způsobit poškození skrze zahřívání [3].

5 Testování SEE

V této kapitule se budu věnovat testování SEE, proč se vůbec používá testování, druhy testování SEE, náchylnost zařízení k SEE a také zařízení pro testování SEE. Testování nám pomáhá najít přítomnost SEE a jejich vlastnosti, důležitým parametrem je rozsah testovaného LET (Linear Energy Transfer) a také celkové množství vyslaných částic. Dále nám testování odhalí například, jestli se jedná o destruktivní, nebo nedestruktivní SEE, dále zda jde o SEU nebo MBU. Také nám odhalí velikost amplitudy a šířku SET. Velice důležité při testování SEE je odhad hodnoty radiace prostředí, ve kterém bude zařízení pracovat. Testování SEE je obvykle prováděno v urychlovačích částic, které ozáří celé testované zařízení ionty, další testovací metody, které nám prozradí jen dočasné informace o SEE zahrnují testování soustředěným iontovým paprskem nebo soustředěným pulsujícím laserem. Některé testy probíhají ve vzduchu, některé ve vakuu. Zapouzdření musí být otevřeno pro nízkoenergetické ionty. Zařízení typu flip-chip může představovat problém, a to ozáření ze špatné strany. V tab. 2 jsou uvedeny zařízení jež byly použity pro testování SEE a také kde se tato zařízení nacházejí.

Tabulka 2: Urychlovače použité pro testování Single Eventů (převzato a upraveno z [3])

Zařízení	Lokace	Částice
88'' Cyklotron	U. C. Berkeley	O, AR, Kr, 4 MeV/n
Bevelac	U. C. Berkeley	Fe, GeV/n
Van de Graff	Kalifornský Tech. Ins.	He, O
Cyklotron	Naval research Lab.	≤ 50 MeV p, 14 MeV n
Cyklotron	U. C. Davis	≤ 50 MeV p, 14 MeV n
Cyklotron	Univerzita Harvard	130 MeV p
Cyklotron	Univerzita Indiana	≤ 200 MeV p
TRIUMPH	British Columbia	400 MeV p
CERN	Švýcarsko	600 MeV p
AGS	Brookhaven NY	4 GeV p

5.1 Urychlovače částic

Urychlovač částic, zkráceně jen urychlovač, je technické zařízení, používané pro dodání kinetické energie nabitým částicím. Nabité částice (ionty nebo elektrony či pozitrony) jsou v urychlovači jednou, nebo opakovaně urychleny rozdílem potenciálů elektrického pole. Urychlovač částic způsobuje čelní srážky mezi dvěma svazky částic stejného druhu,

buď protony nebo různými typy iontů. Při srážce se tyto částice rozptýlí a pokud disponují dostatečně velikou energií vznikají přitom další částice (produkty srážky) [10].

5.1.1 Van de Graaffův urychlovač

Prvním z těchto urychlovačů je Van de Graaffův urychlovač. Základem tohoto urychlovače je generátor vysokého napětí, pohybující se pás izolantu se třením nabíjí a kovovými hroty se náboj přenáší na kulovou kovovou elektrodu. Tento urychlovač dokáže vytvářet elektrické pole zhruba do hodnoty 10 MeV/u (megaelektrovolty na atomovou hmotnostní konstantu). Jeho výhodou je, že bez větších problémů zvládá i menší hodnoty LET pro testování různých druhů zařízení, další výhodou je schopnost rychle měnit různé druhy iontů. Velikou nevýhodou Van de Graaffova generátoru je jeho značně omezený rozsah vytvořené energie, proto v některých případech není možné využít částice s vyšším protonovým číslem [10].

5.1.2 Cyklotron

Druhým v pořadí je Cyklotron, jedná se o urychlovač, který se skládá ze dvou dutých polokulových elektrod (duantů). Tyto elektrody jsou připojeny ke generátoru střídavého napětí o vysoké frekvenci a uzavřeny v evakuovaném prostoru mezi póly elektromagnetu. Nabité částice jsou vystřelovány do středu mezi elektrody kolmo ke smětu magnetických siločar. Kdyby nebylo urychlování, částice by opisovaly kruhovou dráhu podél elektrod. Přivedené střídavé napětí urychluje částice, ovšem pouze v prostoru mezi elektrodami, mezitím dojde k přepólování a částice mohou být znovu urychleny. Tento proces je opakován dokud částice nedosáhnou maximální rychlosti, kterou jim cyklotron dokáže dodat. Po dosažení maximální rychlosti jsou částice odkloněny a opouštějí cyklotron. Oproti předchozímu urychlovači je zde energetické spektrum až 100 MeV/u. Nevýhodou je dlouhá změna druhů iontů [10].

5.1.3 Synchrotron

Synchrotron je vysokoenergetický generátor, jedná se o konkrétní druh kruhového urychlovače částic ve kterém je elektrické i magnetické pole synchronizované s „procházejícími“ částicemi. Dosahuje hodnot až 1000 MeV/u. Je tedy vhodný k testování vesmírných podmínek a to bez stínění.

5.1.4 Bevatron

Za zmínku stojí velice důležitý urychlovač a tím je Bevatron, jedná se o synchrotron, jež byl v kalifornské vládní laboratoři, jeho název je odvozen z jeho činnosti, dokázal urychlovat protony na energie až 1 miliarda elektronvoltů (1 GeV, dříve značeno 1 BeV z anglického billion). Byl na něm objeven antiproton, za což byla udělena Nobelova cena za fyziku. Následně byl používán k urychlování těžkých iontů na tak vysoké energie jako má právě GCR. V ranném testování byl v bevatronu testován letecký počítač, navržen právě pro lety do vesmíru. Pro bevatron se rozhodlo jelikož je schopný urychlit částice až na energii 600 MeV/u. Takovéto částice jsou schopny projít skrz letecký počítač i většinu mikroobvodů, jenž se v něm nacházejí. Tato expozice měla simulovat právě styk s GCR. Počítač byl opatrně vložen do dráhy paprsku, brzy poté co byl vystaven počáteční dávce přestal počítač fungovat. Po opětovném nahození počítač nevykazoval žádné známky poruchy, test byl tedy proveden znovu a se stejným výsledkem - ihned po ozáření počítač přestal fungovat. Důležitým přínosem tedy bylo uvědomění, že GCR zásadně mohou ovlivnit funkci elektroniky ve vesmíru [3].

5.2 Testování pomocí protonů

Zařízení s větší citlivostí by mělo být testováno pomocí protonů, zvláště zařízení s LET $< 15 \text{ MeV.cm}^2/\text{mg}$ protože ve vesmíru dominují protony. Protože LET není přesně definovaná hodnota pro skupinu sekundárních částic vyzařovaných křemíkovým jádrem, je lepší jako míru používat protonovou energii. Pro protonové testování je nutné využívat vysoko energetické urychlovače, nikoli urychlovače pro nižší a střední energii (cyklotron a Van de Graaffův urychlovač), které zde nejsou popsány [10].

6 Zpracování dat SEE

Přijaté data musí být pečlivě prozkoumána a někdy dokonce upravena, předtím než se vyhodnotí možný výskyt chyb ve vesmíru. Data musí být zkoumány na náhodné chyby a také nelogické hodnoty. Velice často se chyby vyskytují kvůli provedení velikého množství testů v příliš krátkém čase, a takto se postupně naakumulují chybná data. Nejčastěji jsou tyto chyby způsobeny dozimetrií. Vypočítaný LET může být potřeba opravit, pokud zařízení vykazuje tzv. „trychtýřový“ efekt. Hloubka zařízení vede k nesouvislostem v datech jako jsou změny v iontech. Oprava této chyby dovoluje, aby hloubka zařízení byla rezolutní a umožní umístit více hodnot v křížové sekci křivky. Co se obvykle jeví jako změna v křížové sekci bývá často změna v kritickém LET. Závislost na kritickém LET může vést k lepšímu pochopení zařízení [2].

Předtím než začneme analyzovat data ze SEE, musíme nejdříve pochopit základní podstatu těchto dat. To znamená, že musíme poznat, jestli se jedná o normální, nebo abnormální jev v datech jež obdržíme.

1) Nelogické, systematické a náhodné chyby:

Nelogické chyby se někdy vyskytují i v nejlepších experimentech a je nutné je zmínit ve výsledném hlášení. Nejčastějším typem vyhnutelné chyby je omyl, jedná se například o zapomenutí vyresetování testovaného zařízení při opětovném testování. Dalším příkladem je použití jednoho programu k nahrávání chyb a vysílání dat a druhý program k zaznamenávání dat. Omylům se lze vyvarovat pečlivostí a opětovným testováním.

Systematické chyby vznikají díky špatným kalibračním nástrojům. Při měření SEE se používá paprsek iontů, jaderná fyzika většinou používá pouze jeden druh paprsku, nicméně při měření SEE se používá serie různých druhů paprsků (rozdílné ionty nebo energie), přičemž každý vyžaduje velice důkladnou kalibraci nástroje, jež je pro vyzařování paprsku určen. Dalším druhem systematické chyby je odečítání výsledku, například číst pouze 32k ze zařízení, které je 64k.

Náhodné chyby se vyskytují z mnoha zdrojů, běžným zdrojem náhodných chyb je kolísající napětí, nebo teplota. Dalším zdrojem jsou drobné poruchy, urychlovač je velice citlivý na elektrický šum a musí být adekvátně odstíněn. Při měření SEE je největším problémem to, že se vyskytují absolutně náhodně a i pomocí opakovaných měření se nebudou vyskytovat tytéž chyby. Počet výskytu SEE v daném časovém intervalu podléhá Poissonovo rozdělení, jak počet výskytu SEE roste budou se data blížit spíše Gaussovo rozdělení, to je nutno pochopit pokud chceme rozumět našim výsledkům [2].

2) Vlastní náhodné chyby:

Single Event data normálně mají Gaussovo rozdělení, standartní odchylka N jevů je $N^{1/2}$. Dílčí standartní odchylka je $\frac{N^{1/2}}{N}$. Tab. 3 ukazuje dílčí standartní odchylku pro různé

množství měření.

Tabulka 3: Dílčí standartní odchylka korespondující s počtem sledovaných zařazení (převzato z [2])

N	% standartních zařazení
30	18,26
100	10,00
300	5,77
1000	3,16
3000	1,83
10000	1,00

Pro toto rozdělení 1 ze 3 bodů je mimo standartní odchylku. Více než tři body mimo standartní odchylku jsou velice vzácné. Datové body jsou většinou prokládány pomocí pruhu jež indikuje standartní hodnotu. Toto je velice nápomocné při posuzování výsledných dat. Pokud všechny body jsou uvnitř jedné standartní odchylky, někdo počítal data špatně, pokud rozpětí v datech je důsledně více než jedna standartní odchylka, bude se pravděpodobně jednat o systematickou chybu, ne o chybu náhodnou. Jedná-li se o případ kdy jeden nebo více bodů, jež se vyskytují dále než tři standartní odchylky od průměru jedná se o závažnou chybu experimentu [2].

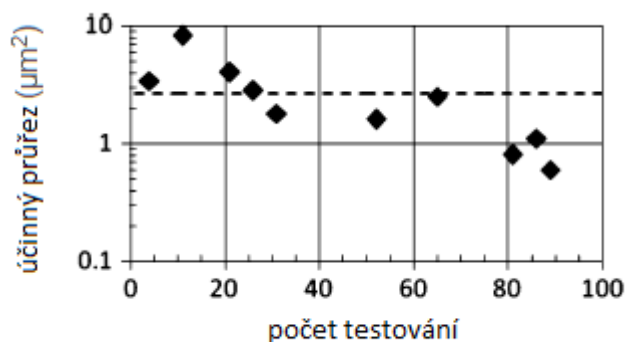
3) *Zamítnutí dat:*

Pokud jasně víme, že při experimentu došlo k chybám, výsledná data musí být zamítnuta a experiment se musí vykonat znovu a to i v případě, že data by byly shodné s předpokládanými výsledky. Pokud měření probíhala správně je přesto kontroverzní, jestli data brát v potaz nebo ne, někteří se přiklání k tomu, že všechna data by měly být zachována, ideálně by mělo proběhnout tolik měření, že zachování nebo odmítnutí pochybného měření by mělo jen velmi malý vliv na průměrnou hodnotu. Existuje však elegantnější řešení, jež může být aplikováno na různé druhy testovacích vzorků (i na ty velmi malé), které nám dovoluje zvolit pravděpodobnost, nebo risk, který jsme ochotni přijmout při pozorování. Společnou a použitelnou aproximací kritérií pro maximální akceptovatelné rozpětí v datech je použití hodnoty při třech standardních odchylkách. Při normálním rozdělení by se měla odchylka projevit pouze třikrát během tisíce. Obvykle však máme pouze 5 - 25 vzorků, takže tento výskyt je velice nepravděpodobný. Všechny data vyskytující se mimo tři standartní odchylky by měli být zváženy k zamítnutí, ne však rovnou zamítnuty [2].

6.1 Opakované testování

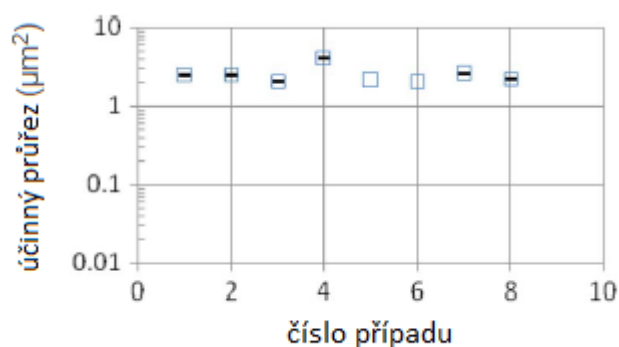
Nejlepší metodou k analýze dat je bezpochyby opakované testování. Testování probíhá se stejným zařízením, při stejných podmínkách několikrát po sobě při stejném toku dat.

Obr. 15 ukazuje vzorek opakovaných dat, jež jsou částí velké skupiny experimentů. Testování proběhlo pod naprosto stejnými podmínkami s velmi dobrými statistikami při každém opakovaném měření. Systematické chyby v tomto případě se vyskytují v 83%. Experiment neustále mění ionty, takže je také dost pravděpodobné, že se jedná o chybu dozimetru [2].



Obrázek 15: Data se příležitostně opakují ve velké sérii běhů. Na rozdíl od obr. 16 si experimentátoři nevšimli, že jejich data jsou nekonzistentní (převzato a upraveno z [2])

Data na obr. 16 jsou malým vzorkem ze sekvence 89 měření, u kterých bylo napětí, teplota a ionty opakovaně měněny. Celkem bylo 18 změn iontů během celého testování. Tento graf ukazuje měření provedené v různých časech během experimentu s použitím stejného iontu, úhlů, teplot, a napětí. Data na ose Y jsou vynesena v logaritmickém měřítku a reprezentují účinný průřez (Účinný průřez vyjadřuje pravděpodobnost, s jakou bude některá ostřelující částice z nalétávajícího svazku interagovat s částicí terče). Jak můžeme vidět jeden bod je mimo tři standardní odchylky. Je skoro dvakrát výše než ostatní body, mohlo by se jednat o chybu kdy nebyl zmáčknut reset. Při bližším prozkoumání grafu můžeme najít, že rozptyl v bodech je větší než se na první pohled zdá, proto musíme data převést do jiného grafu (viz. obr 17), u kterého už není použito logaritmické měřítko, ale měřítko lineární. Očekávali jsme, že 2/3 bodů budou vykazovat chybu, která překročí průměrnou hodnotu, avšak žádný z nich jí nepřekročil. Očividně jsou zde systematické chyby mnohem větší než statistické náhodné chyby.



Obrázek 16: Vzorová data s odchýleným bodem. Odchýlený bod je dvakrát vyšší než ostatní body. To je zjevně omyl a tento bod by měl být zamítnut. (převzato a upraveno z [2])



Obrázek 17: Tato data ukazují, že zde se systematické chyby vyskytují mnohem větší než statistické chyby. Zdá se, že se vyskytují při změnách paprsku (X), což indikuje problémy dozimetru. (převzato a upraveno z [2])

Standartní odchylka v datech je nastavena na 10% a ne 1.5%, experimentální tým se tedy musí rozhodnout jakou kvalitu experimentu vlastně podstupují a poté až vyhodnocovat kvalitu experimentu [2].

7 Zabránění SEE

Z předchozích kapitol by nám mělo být zřejmé jaké jsou SEE rostoucím problémem, samozřejmě je také možné jejich dopad minimalizovat a v lepším případě jím úplně zabránit. V této kapitole budou probrány některé možnosti, jež jsou v praxi využívány.

Jak již bylo rozebráno v kapitole 3 jednotlivé druhy záření se dají stínit, problematika stínění je však daleko větší, především záleží na velikosti materiálu, kterým se bude stínit a to z hlediska ekonomického. Druh materiálu je pak volen podle prostředí, ve kterém se bude daný obvod (zařízení) pohybovat. Problém nastává u stínění neutronového záření, to je známé tím, že projde skoro všemi materiály jež jsou běžně pro stínění používány. Pro úspěšné odstínění je zapotřebí zpomalit průchod vysokoenergetických neutronů, poté tyto neutrony absorbovat a nakonec utlumit sekundární záření jež vzniklo právě útlumem neutronového záření. Neutrony lze zastavit kolizací s částicí o podobné hmotnosti, například jádru vodíku.

Velmi efektivní se jeví také používání samoopravných kódů. Tyto kódy dokáží chybu nejen detekovat ale dokonce ji i opraví a obnoví tak jejich původní informaci. Občas bývají zaměněny s kódy samodetekujícími, ty však chyby pouze detekují, ale nejsou schopny ji opravit. Mezi samoopravné kódy patří například Hammingovi kódy, BCH kódy, Reed-Solomonovy kódy a také LDPC (Low-density parity-check code). Pokud dojde k mnohonásobným chybám a samoopravné kódy už nejsou schopny data obnovit je nutné pročišťovat paměť. V nejhorších případech je nutná reinitializace obvodu.

Dalším způsobem jak minimalizovat SEE je zmírnit integraci integrovaných obvodů. Jak již bylo zmíněno k SEE dochází také z důvodu neustálé miniaturizace součástek. Existují součástky jež jsou radiačně odolné, proto při navrhování obvodů musí být bráno v potaz, kde bude daný obvod pracovat, různá prostředí vykazují různé záření.

8 Závěr

V práci jsem se věnoval popisu vůbec prvních zaznamenaných SEE ve vesmíru a důležitým osobnostem díky nimž se o SEE dozvěděla širší veřejnost.

Ve třetí kapitole bylo popsáno ionizující záření hlavně neutronové a kosmické, které je považováno z hlediska SEE jako nejdůležitější, byly zde taky uvedeny základní vztahy jež se vztahují k záření obecně. Čtvrtá kapitola byla věnována vzniku SEE a jejich vlivu na obvody, byly zde probrány veškeré známé projevy SEE a to jak destruktivní tak nedestruktivní. V páté kapitole jsem se věnoval testovacím přístrojům, jež se používají pro testování SEE, hlavně pak urychlovačům částic, krátká zmínka byla také věnována testování za pomoci protonů. V šesté kapitole jsem nastínil jak se vyhodnocují data z testování SEE. Popsal jsem rozdíl mezi systematickými, náhodnými a nelogickými chybami a také proč je výhodné opakované testování. V poslední kapitole jsem se věnoval tomu jak vlivům SEE zabránit, byla zde nadhozena problematika týkající se použití radiačně odolných součástek a prostředí v němž se obvody používají, dále také kdy je výhodné obvody stínit, a také proč jsou výhodné samoopravné kódy.

SEE jsou rostoucím problémem v oblasti elektrotechniky. Přestože se lze se SEE setkat převážně v oblasti vesmírného prostoru, nemůžeme je na zemi úplně ignorovat. Existují možnosti jak jejich dopad minimalizovat, ovšem vždy jsou s tím spojeny jistá negativa. SEE mohou být destruktivní i nedestruktivní. Dnes jsou považovány za důležitý faktor, který omezuje spolehlivost a funkčnost elektronických obvodů, a proto je nelze zanedbat při návrhu elektronických systémů.

Reference

- [1] NICOLAIDIS, Michael. Soft errors in modern electronic systems. 1. New York: Springer, c2011. *Frontiers in electronic testing*, 41. ISBN 978-1-4419-6993-4.
- [2] PETERSEN, E. L. Single-Event Data Analysis. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2008, 55(6), 2819-2841. DOI: 10.1109/TNS.2008.2007903. ISSN 0018-9499. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4723742/>
- [3] PETERSEN, E. L., R. KOGA, M. A. SHOGA, J. C. PICKEL a W. E. PRICE. The Single Event Revolution. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2013, 60(3), 1824-1835. DOI: 10.1109/TNS.2013.2248065. ISSN 0018-9499. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6484210/>
- [4] YERMALAYEVA, Darya. VLIV RADIACE NA VLASTNOSTI POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTEK. Brno, 2018. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.
- [5] Ionizující záření. <https://www.wikiskripta.eu> [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Ionizuj%C3%ADc%C3%AD_z%C3%A1%C5%99en%C3%AD
- [6] Radiation Effects — Effects on Materials [online]. 2015 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://hps.org/publicinformation/ate/q11162.html>
- [7] Záření alfa [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Z%C3%A1%C5%99en%C3%AD_alfa
- [8] Záření beta [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Z%C3%A1%C5%99en%C3%AD_beta
- [9] Gama záření [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Z%C3%A1%C5%99en%C3%AD_gama
- [10] KOGA, R. Single-event effect ground test issues. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 43(2), 661-670. DOI: 10.1109/23.490909. ISSN 00189499. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/490909/>
- [11] Ionizing radiation [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.mirion.com/learning-center/radiation-safety-basics/types-of-ionizing-radiation>

- [12] Comptonův rozptyl [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z:
https://www.wikiskripta.eu/w/Compton%C5%AFv_rozptyl
- [13] Fotoelektrický jev [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z:
https://www.wikiskripta.eu/w/Fotoelektrick%C3%BD_jev
- [14] Elektron-pozitron pár [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z:
https://www.wikiskripta.eu/w/Elektron-pozitronov%C3%A9_p%C3%A1ry
- [15] Kosmické záření [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z:
<http://large.stanford.edu/courses/2012/ph241/copeland2/>
- [16] BUCHNER, Stephen a Dale MCMORROW. Overview of Single Event Effects. Presented at SERESSA 2015, Puebla, Mexico.